

金属矿山隐伏矿找矿预测理论与方法

彭省临, 邵拥军, 张建东

PENG Sheng-lin, SHAO Yong-jun, ZHANG Jian-dong

中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083

School of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

摘要:针对金属矿山隐伏矿找矿预测的特点和难点问题, 简要介绍了矿床模式、成矿系列、成矿系统、多因复成成矿、地质异常理论等地质找矿预测的基本理论, 以及模型找矿预测方法的内涵和发展趋势; 重点介绍了物化探新技术新方法的性能特点和在隐伏矿找矿预测中的应用前景; 对数学地质、地理信息系统、找矿技术方法的有效性定量评价等新技术新方法进行了扼要介绍。

关键词: 隐伏矿; 找矿预测; 理论与方法; 金属矿山

中图分类号: P618.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)04-0538-06

Peng S L, Shao Y J, Zhang J D. Prospecting prediction theory and method about concealed ore-deposit in metal mine. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(4): 538-543

Abstract: It was introduced in this paper that some basic geological prospecting prediction theories include mineral deposit models, metallogenic series, metallogenic system, multi-genetic compounds of mineralization, geological abnormality, and the content and developing trend of the model prediction method, as well as the performance characteristics and their application in concealed ore-deposit prediction about new technologies and methods of geophysical and geochemical prospecting. Meanwhile, some new technologies and methods, such as mathematical geology, geographic information systems (GIS), and quantitative evaluation of the effectiveness of prospecting technique method, were also briefly introduced in the paper.

Key words: concealed ore-deposit; prospecting prediction; theory and method; metal mine

金属矿山隐伏矿找矿预测多在已知矿床或矿田范围内进行, 属大比例尺找矿预测的范畴。中国当前正开展的“危机矿山新一轮找矿”工程中很多都涉及金属危机矿山深边部隐伏矿找矿预测的问题, 其特点是: 预测范围较小, 一般是几到几十平方千米, 深度在 1500~2000m 以浅; 探查对象与已知矿床(化)可比性强或联系密切; 可供利用的前人资料、成果和数据信息较多; 人为活动, 如用电、建筑、矿山开采堆积物等干扰大^[1]。

隐伏矿大比例尺找矿预测中的关键科学问题是: 矿体空间定位机理、定位规律和矿致异常的形成

机理; 所涉及的技术关键和难点是增大测深, 提高仪器的抗干扰能力和分辨率, 区分矿与非矿异常, 矿体三维定位及复杂非线性环境下的多元信息综合预测等。叶天竺等^[2]认为, 金属矿床深部找矿的基本技术路线是: 地质研究是基础条件, 物探、化探是技术支撑条件, 钻探是实现条件。因此, 隐伏矿找矿预测技术的进步也将随着地、物、化、遥、钻等探矿技术方法的创新发展而不断向前推进^[2-3]。

1 隐伏矿找矿预测的基本理论与方法

地质找矿的技术进步主要体现在地质找矿理论

收稿日期: 2010-11-05; 修订日期: 2011-03-30

资助项目: 科技部国家“十一五”规划科技支撑计划课题《铜陵地区危机铜矿山大比例尺定位预测技术开发》(编号: 2006BAB01B07)和国家“973”计划前期研究专项课题《危机矿山接替资源大比例尺定位预测基础研究》(编号: 2007CB416608)

作者简介: 彭省临(1948-), 男, 博士, 教授, 从事金属矿成矿学和矿床定位预测研究。E-mail: psl@csu.edu.cn

的创新和方法的综合上。1993年4月,在有31个国家和地区参加的美国“丹佛会议”上,众多学者形成了共识,即“未来矿产勘查的成功率将取决于综合因素,首先是预测选区的准确性,这将很大程度上取决于各类矿床模型的研制、使用和完善,取决于成矿理论和预测方法的创新与发展”。

1.1 地质找矿理论与方法

由于地质找矿工作正由地表矿、浅部矿和易识别矿转向寻找隐伏矿、深部矿和难识别矿,找矿方法也由以经验找矿为主转向以理论找矿为主。矿床模式理论一直是国内外指导隐伏矿找矿预测的经典理论。除此之外,由中国的地质科学家独创的成矿系列、成矿系统、地洼递进成矿与多因复成成矿、地质异常理论等成矿学理论大大开拓了找矿思路,为矿山深边部隐伏矿找矿预测增添了强有力的找矿基础理论。

矿床模式理论以“类比”原理为基础,已广泛用于深部找矿中。加拿大地质调查所编著的《加拿大矿床类型》^[4]、美国矿床学家考克斯D P等编著的《矿床模式》^[9]和中国裴荣富等^[6]编著的《中国矿床模式》为其典型专著。矿床模式又称成矿模式,是对同一类型(或相似的)矿床的地质、构造、地球物理、地球化学和其它基本特征进行概括,用简洁的文字、图表表述,反映对矿床成矿规律认识的一种表达形式。矿床模式可以是描述性的,称经验模式;也可以是理论性的,称成因模式或概念模式^[7]。

成矿系列^[8-11]是指在一定的地质时期和一定的地质环境中,在一定的主导地质成矿作用下形成的,在时间、空间和成因上有密切联系,但具体生成条件有差别的一组矿床类型的组合。成矿系列着重研究成矿区带中一种主导地质作用下形成的诸矿床之间的时空、成因联系,对于同一成矿区带中各种有成因联系的不同矿床类型的隐伏矿体定位预测具有重要的指导意义。

成矿系统^[12-15]是指在一定的地质时、空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体。成矿系统主要从成矿要素、成矿作用过程、成矿作用动力学去研究成矿的总体特征,包括矿床组合及有关地质异常形成的原理。这种整体性的、全方位的思维大大加深了矿山的深、边部隐伏矿体综合定位预测的研究和实践。

以“多物质来源、多成矿阶段、多成矿作用、多成因类型和多控矿因素”为特征的“多因复成矿床”成矿理论^[16-22]是由陈国达院士最早提出的,系地洼递进成矿理论的重要组成部分。强调在研究矿床的形成过程中,除了要重视矿床形成的有利空间因素外,还应考虑矿床形成的有利时间因素;同时提出应该用“时、空、物、因”四维分析方法来研究矿床的形成过程、特点和分布规律。

以“相似类比”原理为基础,通过研究已知区内矿床成矿规律进而对具有相似地质条件的未知区进行成矿预测是过去几十年来贯用的思维。这种思维对发现同类矿床具有重要意义,但是也有其局限性,即不能发现新类型矿床,尤其是点型分布的大型、超大型矿床。为了弥补“类比”原理找矿的不足,20世纪90年代,赵鹏大等^[23-25]提出了以“求异”原理为基础的“地质异常理论”。其主要内容是:地质异常是在成分结构、构造或成因序次上与周围环境有明显差异的地质体或地质组合,不同矿种、不同矿床类型所需的成矿地质环境不同,因而不同环境所形成的地质异常也总是风格迥异的。

裴荣富等^[26-27]在总结国内外300多个大型矿床的基础上,提出中国特大型矿床的形成具有时空偏在性,主要表现在对矿种、矿床类型、成矿时间和成矿背景上均具十分明显的选择性。这种成矿偏在性主要取决于地、物、化、遥等多种控矿要素非常罕见的耦合汇聚。“偏在性”理论的提出为特大型隐伏矿床的找矿预测提供了新的思路。

吕古贤等^[28-30]以构造成岩成矿和地质力学矿田构造研究为基础,从构造动力学和构造物理化学成矿机制方面创造性地提出了矿田构造岩相界面找矿方法。如①岩相分带界面找矿、②构造岩分带界面找矿、③成矿岩石矿物地球化学分带界面找矿、④构造物理化学分带界面找矿等。

1.2 基本预测理论与方法

建立在矿床模式理论基础上的模型预测法在隐伏矿找矿预测中一直占据主导地位。模型预测法分概念模型预测法和经验模型预测法。概念模型预测法亦称矿床模型法,以矿床模型为驱动,在实际预测评价中,通过与一个或多个矿床模型的对比,确定与模型的地质特征和成矿环境相类似的远景区,然后详细研究远景区的地质特征,以圈出与模型地质特征更相近的找矿靶区,最后利用统计方法和已知矿

床的资源量等有关信息,预测未发现的矿床数量和资源量。经验模型预测法又称多源信息综合评价法,以勘查数据为驱动,主要研究区域矿床与多元地质找矿信息之间的关系,通过定量分析方法,特别是地理信息系统的应用,建立起区域成矿有利度和资源量与多元地质信息之间的统计规律,形成经验模型,实现资源潜力的定量估计。

世界各国都充分开展了模型找矿,取得了可喜的成果。如美国卡拉马祖斑岩铜矿床、加拿大直布罗陀斑岩铜矿床、墨西哥拉卡里达德斑岩铜矿床、葡萄牙内维斯-科尔沃铜矿床、澳大利亚奥林匹克坝铜矿床等都是根据已有的成矿模型找到的大型—超大型矿床。中国在这方面也有不少成功的例子,如个旧老厂双竹矿床、大厂大福楼锡矿床、南山铁矿深部发现的 8000×10⁴t 凹山式铁矿等^[31]。

模型找矿预测方法的发展趋势是将概念模型方法和经验模型方法有机结合起来,强调找矿信息、找矿经验和找矿理论的融合,利用地质、地球物理、地球化学、遥感方法,以及矿床(点)的分布特征、矿床勘探历史等多源信息,以矿床模型为前提,建立区域成矿与多元地质信息的定量预测模型,进行资源潜力的定量预测^[32-34]。

数字矿床模型评价方法正是这种发展趋势的具体体现。它以矿床模型和勘查数据为驱动,通过将描述性矿床模型数字化、知识化,以计算机可以直接识别和处理的数据、知识和符号形式,在计算机中建立起与之对应的数字化矿床模型。数字矿床模型开始于美国地质调查局,其网页公开了正在进行的“高级资源评价方法”研究计划,其中包含了有关数字矿床模型的研究内容^[32]。中国王勇毅等^[35]初步建立了中国铜矿的数字矿床模型;廖崇高^[36]通过对地、物、化、遥等多源信息的量化处理,在兰坪盆地进行了成矿预测,取得了较好的效果;刘燕君等^[37]利用多源信息综合分析方法对东坪式金矿盲矿体成功地进行了预测;王世称等^[38]在研究金矿体的定位预测中,也运用了多源信息综合分析法,取得了明显的成效;毛先成等^[39-40]研究开发了复杂地质体三维形态分析、控矿地质因素场建模、成矿信息三维定量分析提取和隐伏矿体三维可视化定位定量预测等关键技术,建立了铜陵凤凰山铜矿-2500m 以上隐伏矿三维可视化定位定量预测模型。

综上所述,目前国内外找矿预测的共同特征是:

在预测对象、预测尺度和预测精度上都显示出以局部化、具体化、精细化、精确化、数字化为特点的大比例尺隐伏矿定位预测的发展趋向。

2 隐伏矿定位预测新技术新方法

2.1 物探技术方法

除了常规的重力法、磁法、电法、地震法、放射性法、地温法等以外,近年来还有一些新方法在隐伏矿体定位预测中发挥了重要的作用。

目前在金属矿山深部找矿中应用较多的地面物探技术主要有大地电磁法(MT)、瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、EH4 电导率成像系统(CSAMT+AMT)法、激发极化法(IP)、浅层地震勘探法、多频激电相位法、近矿多参数激电法、井中物探法等。

最新的物探观测系统,如加拿大凤凰公司相继推出的 V5-2000 型、V8 阵列式多功能卫星同步电磁系统(SSMT)和 EM-57、EM-67 系列时间域电磁仪,美国 Zonge 相继推出的 GDP-16、GDP-32 多功能电磁系统和能够进行长周期天然场大地电磁测量的多功能大地电磁系统,美国 EMI 公司推出的 EH-4 电磁系统和 MT-24 阵列式大地电磁系统,德国 Metronix 公司相继推出的可控源电磁填图(CSEMM)系统、新一代产品 GMS-07 综合电磁法仪等,这些技术方法均以勘探深度大、精度高、测量快、数据采集处理全自动化等而占优势。德国 Metronix 公司生产的 GMS-07 综合电磁法仪将磁场和电场传感器直接与主机 ADU-07 连接,组成完整的 GMS-07 观测系统,多个 ADU-07 或多个 GMS-07 可用轻便的网线、无线局域网或内置的 GPS 连接在一起,组成多道、同时采集电磁场信号,适合于探测 0~3000m 深度范围内任何目标层(体)的系统。这些技术方法目前已在国内外深部找矿中广泛应用。国内中南大学何继善院士研制的“三频激电仪”以勘探深度大、分辨率高、能区分矿与非矿异常、轻便、操作简便等优势成为复杂地形地区隐伏矿找矿预测中广泛使用的物探仪器^{[6,31,41-43]①}。

除上述方法外,目前正在研究探索的 3 种深部物探技术是:①成矿带深部地壳反射技术,可提供区域构造框架和成矿系统的具体信息;②高分辨率地震反射技术,直接用于金属矿深部找矿,尤其

对探测容矿构造和矿体周围的蚀变带效果更好;③地球物理层析成像技术,可直接给出矿体和容矿构造的空间形态。这些方法的探测深度将超过-1000km以下。

目前在金属矿深部找矿中应用较多的航空物探技术主要有 Falcon、MegaTEM、SPECTREM、TEMPEST、HOISTEM、NEWTEM、Scorpion 等,主要应用于矿集区的区域填图、靶区圈定等阶段,大大提高了工作效率。如澳大利亚合作研究中心研制的 TEMPEST 系统使用高灵敏度磁探头测量地质体产生的二次磁场,探测深度可达 300m;澳大利亚 BHP Billiton 公司研制的 Falcon 航空中立梯度张量测量系统脱胎于美国的军事技术,曾经获得澳大利亚 CSIRO 2000 年科研成果奖;加拿大 GEDEX 公司研制的高分辨率航空重力梯度仪,据称能探测到 12km 深处的固体矿产、石油和天然气^①。

遥感异常信息多层次分离提取技术,运用各种数学方法和图像增强手段,多层次地从遥感信息中逐步剔除背景信息(即干扰信息),一次次地分离提取出矿化异常信息,如与金属矿化有关的硅(铁)化蚀变、泥化蚀变、碳酸盐化蚀变信息等为目标特征信息,可为筛选找矿靶区提供一种辅助手段。

国内外目前流行利用综合物探方法来找矿,取得了明显的经济效益和找矿效益。澳大利亚利用综合物探法在新南威尔士科巴地区找到了一个大型的隐伏铅锌、银多金属矿床;前苏联也曾利用综合物探法在雅库特、哈萨克斯坦等地区相继发现了一系列新矿床。国外井中物探采用较多的是井中磁测、井中激发极化法、深部充电法、井中瞬变电磁法等组合,这些方法在俄罗斯、加拿大、澳大利亚、哈萨克斯坦等国的深部隐伏矿找矿中发挥了主导作用,成为圈定深部隐伏矿床的有效组合方法。近些年来,井中物探法在国内深部隐伏矿找矿中也发挥着越来越重要的作用。中南大学应用三频激电技术、CSAMT、EH-4、GSM-07 等技术结合地质、构造地球化学等方法相继在中条山铜矿、湘西金矿、铜陵凤凰山铜矿、铜山铜矿、安庆铜矿、云南个旧锡矿、山东招远金矿、湖北大冶铜铁多金属矿等数十个危机矿山深部隐伏矿找矿预测中取得了明显的成效。曾庆栋等^[44]利用不同类型金矿的伽马能谱特征在隐伏金矿体的定位预测中取得了明显的效果。王富同等利用激电法、磁法并结合 1:50000 化探资料成功地在新疆土

屋地区发现了土屋斑岩成矿带(包括土屋铜矿、延东铜矿和灵龙铜矿)^{[28,44]①}。

2.2 化探技术方法

除常规的化探技术方法如原生晕法、次生晕法、水化学法、分散流法等外,目前在金属矿山深部隐伏矿找矿中应用较多、效果较好的化探新技术方法主要有深穿透地球化学找矿法和构造地球化学找矿法。

深穿透地球化学法是一类能探测深部隐伏矿体发出的极微弱直接信息的化探新技术方法。20 世纪 70 年代前期诞生了偏提取法、水化学方法、生物地球化学方法和气体地球化学方法;80 年代发展了地电化学方法(CHIM)、元素赋存形式法(MPF)、热磁地球化学法(TMGM)和地气法;90 年代以来,一批改进或新生成的方法应运而生,深穿透地球化学法已经包括了美国和加拿大的酶提取法(ENZYME LEACH)、澳大利亚的活动态金属离子法(MMI)、中国的金属元素活动态提取法(MOMEO)和动态地球气纳微金属测量法(NAMEG)等。活动态金属离子法(MMI)能探测到地下 700m 深度的矿体,酶提取法(ENZYME LEACH)探测深度可达几百米。酶提取法、活动态金属离子法、金属元素活动态提取法、动态地球气纳微金属测量法等深穿透地球化学方法因其在深部隐伏矿体探测方面具有针对性强、快速、有效、低成本、高精度的特点,探查效果优于一般的化探方法;加之在地表浮土覆盖区,这些方法还可以避免构造地球化学的采样难题,因此已被广泛应用于隐伏矿的找矿中。目前,国内外仍十分重视这类方法的深化研究,国际上专门组织了《深穿透地球化学》国际合作项目,大部分研究报告已在国际勘查地球化学协会的网站公布,其目的是进一步推动新一代“深穿透地球化学”偏提取技术的发展^[7,45-46]。

构造地球化学法通过分析构造(主要是各种高渗透性的导通性构造)中的成矿指示元素的地球化学晕来推测深部的隐伏矿化情况,又称构造原生晕法。该方法在许多方面优于传统的原生晕技术:①可以更有效地探测深部隐伏矿化在地表形成的微弱地球化学异常;②其采样以构造格架为主要控制标准,非规则网度采样,可以在不漏掉矿化的前提下降低采样数量,减少勘查成本;③由于充分考虑了构造对成矿成晕的控制,更加便于异常的解释。一般情况下,只要地表有构造与深部矿体相通,该方法均能有

所反映,从理论上讲,构造的连通性越好,矿体埋深越小、规模越大,构造地球化学异常就越强烈。因此,该方法在与汽水热液活动有关的各种矿床类型隐伏矿的找矿中十分有效。

2.3 其它新技术、新方法

除常规的多元统计方法外,目前在危机矿山深部找矿中常用的数学地质方法有逻辑信息法、特征分析法、找矿信息量法、欧氏距离法、综合趋势分析法、模糊聚类分析法、马尔科夫概型分析法、对应分析、非线性映射分析、切比雪夫曲线法、有利因素相关法、杨氏复杂矿床评价法、证据权重法、信息量法、小波分析法等,各种方法在隐伏矿定位预测中均发挥了各自的优势。分形分析、耗散结构分析等非线性分析技术和数值模拟技术在隐伏矿定位预测中已开始尝试应用。

地理信息系统(GIS)可以方便地将地理上相关的地、物、化、遥信息综合在一起进行多学科的分析。当前隐伏矿定位预测正朝着多元信息综合定位预测的方向推进。矿床定位预测从本质上讲是个空间分析问题。由于 GIS 能同时处理空间数据和属性数据,并能以很高的速度处理空间数据和各种特征信息,无疑是处理多元信息、实现多元信息综合定位预测最有利的工具。国内外目前流行的地理信息系统平台有 MapGIS、MapInfo、ArcInfo 等。国内外的实践证明, GIS 的应用彻底改变了传统成矿预测的方法体系,极大地提高了预测效率和水平,简化了预测过程。从理论、技术、逻辑、效果来看,以 GIS 为主要工具的矿产资源预测方法都展示了广阔的应用前景,成为地质学家不可缺少的划时代的新工具。

在运用多种找矿技术方法开展隐伏矿定位预测中,找矿技术方法的有效性定量评价方法可为深部隐伏资源的三维定位定量预测提供关键参数。近年来,中南大学铜陵科研团队研究提出了 Meta 分析法、有效度评价法等定量评价找矿技术有效性的新方法。彭省临等^[42]首次将 Meta 分析方法移植应用于找矿预测领域,该方法可用于在开展隐伏矿定位预测的试验剖面上优选最佳的找矿预测技术及其组合,同时也可作为“客观赋权”提供更为客观科学的依据。陈进等^[47]研究提出了一种基于剖面对比的有效性定量评价新方法——有效度评价法,并以凤凰山铜矿物探可控源音频大地电磁(CSAMT)法 12 条探测剖面为例,定量确定了 CSAMT 法在凤凰山铜矿

预测找矿目标体时的有效程度。在勘查程度高的矿山开展深部隐伏矿定位定量预测中有效度评价法尤为适用。这些新方法为突破隐伏矿三维定量定位预测中的“客观赋权”、“技术优化集成”等瓶颈难题,深层次挖掘地、物、化、遥等数据信息的潜力提供了新途径。

此外,一些高新技术(如 RS 技术、GPS 技术、人工神经网络技术、图形图像处理技术、数据仓库技术、非线性科学技术、计算机网络技术、3D GIS 技术、数据集成技术等)在找矿预测中的应用,都促进了隐伏矿找矿预测向科学化、系统化、信息化、动态化和可视化的定量、定位预测的方向发展。

参考文献

- [1]彭省临,刘亮明,赖健清,等.论生产矿山深、边部隐伏矿定位预测的途径与方法[C]//中国地质学会 80 周年学术文集.北京:地质出版社,2002:708-712.
- [2]叶天竺,肖克炎,严光生.矿床模型综合地质信息预测技术研究[J].地学前缘,2007,14(5):11-19.
- [3]彭省临,张建东,赖健清,等.危机矿山深部找矿理论与方法研究[C]//陈毓川,薛春纪,张长青.第九届全国矿床会议论文集.北京:地质出版社,2008:656-657.
- [4]埃克斯特兰德 D R,主编.黄典豪,聂凤军,译.加拿大矿床类型地质概要[M].北京:地质出版社,1990:1-111.
- [5]考克斯 D P,辛格 D A,编.宋伯庆,李文祥,朱裕生,等,译.矿床地质[M].北京:地质出版社,1990:1-378.
- [6]裴荣富.中国矿床模式[M].北京:地质出版社,1990:1-357.
- [7]《地球科学大辞典》编委会.地球科学大辞典(应用科学卷)[M].北京:地质出版社,2005:1-1201.
- [8]程裕淇,陈毓川,赵一鸣.初论矿床的成矿系列[J].中国地质科学院院报,1979,1:32-57.
- [9]程裕淇,陈毓川,赵一鸣.再论矿床的成矿系列[J].中国地质科学院院报,1983,6:1-64.
- [10]陈毓川,裴荣富,宋天锐,等.中国矿床成矿系列初论[M].北京:地质出版社,1998:1-104.
- [11]陈毓川,裴荣富,王登红.三论矿床的成矿系列问题[J].地质学报,2006,80(10):1501-1508.
- [12]翟裕生.论成矿系统[J].地学前缘,1999,6(1):13-27.
- [13]翟裕生,彭润民,邓军.成矿系统分析与新类型矿床预测[J].地学前缘,2000,7(1):123-132.
- [14]翟裕生.地球系统、成矿系统到勘查系统[J].地学前缘,2007,14(1):172-181.
- [15]朱创业.成矿系统研究现状及发展趋势[J].成都理工学院学报,2000,27(1):50-53.
- [16]陈国达.成矿构造研究法[M].北京:地质出版社,1978:1-413.
- [17]陈国达.多因复成矿床并在地壳演化规律看其形成机理[J].大地构造与成矿学,1982,6(1):1-55.
- [18]陈国达.地洼学说的新进展[M].北京:科学出版社,1992:126-155.

- [19]陈国达.关于多因复成矿床的一些问题[J].大地构造与成矿学, 2000,24(3):199-201.
- [20]彭省临.论华南古断裂谷与多因复成铜多金属矿床的关系[J].中南矿冶学院学报,1991,22(5):494-499.
- [21]彭省临,陈子龙.多因复成矿床及其研究方法[C]//彭省临,戴塔根.地洼学说研究与应用.长沙:中南工业大学出版社,1992:1-7.
- [22]彭省临.湘南地洼型铅锌矿形成机理[M].长沙:中南工业大学出版社,1992:1-66.
- [23]赵鹏大,池顺都.初论地质异常[J].地球科学,1991,16(3):241-248.
- [24]赵鹏大,孟宪国.地质异常与矿产预测[J].地球科学,1993,18(1):39-46.
- [25]赵鹏大,王京贵,饶明辉.中国地质异常[J].地球科学,1995,20(2): 117-127.
- [26]裴荣富,熊群尧.中国特大型金属矿床成矿偏在性与成矿构造要素聚敛场[J].矿床地质, 1999,18(1):37-46.
- [27]裴荣富,叶锦华,梅燕雄,等.特大型矿床研究若干问题探讨[J].中国地质,2001,28(7):9-15.
- [28]吕古贤,邓军,倪师军,等.构造物理化学成矿理论探讨[J].大地构造与成矿学,2003,27(3):250-263.
- [29]吕古贤,孔庆存.胶东玲珑-焦家式金矿地质[M].北京:科学出版社,1993:1-253.
- [30]吕古贤,林文蔚,罗元华,等.构造物理化学与金矿成矿预测[M].北京:地质出版社,1999:1-458.
- [31]彭省临,邵拥军.隐伏矿体定位预测研究现状及发展趋势[J].大地构造与成矿学, 2001, 25(3):329-334.
- [32]翟裕生,彭润民,邓军,等.区域成矿学与找矿新思路[J].现代地质, 2001,15(2):151-156.
- [33]翟裕生.走向 21 世纪矿床学[J].矿床地质,2001,20(1):10-14.
- [34]郭远生,唐荆元.矿床学进展与未来趋势[J].中国矿业,2005,14(8): 8-10.
- [35]王勇毅,肖克炎,朱裕生,等.初论中国铜矿数字矿床模型[J].地质与勘探,2003,39(3):20-24.
- [36]廖崇高.兰坪盆地成矿预测中的多元信息定量分析[J].矿床地质, 2001,(3): 292-297.
- [37]刘燕君,金丽芳.东坪式金矿盲矿体的多元信息预测研究[J].国土资源遥感, 1994,(1): 15-22.
- [38]王世称,陈永清.金矿综合信息成矿系列预测理论体系[J].黄金地质,1995,1(1):1-7.
- [39]毛先成,戴塔根,吴湘滨,等.危机矿山深边部隐伏矿体立体定量预测研究——以广西大厂锡多金属矿床为例[J].中国地质,2009,36(2):424-435.
- [40]毛先成,周艳红,陈进,等.危机矿山深、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例[J].地质通报, 2010,29(2/3):401-413.
- [41]彭省临,刘亮明,赖健清,等.大型矿山接替资源勘查技术与示范研究[M].北京:地质出版社,2004: 1-224.
- [42]彭省临,王颖,邵拥军,等. Meta 分析在深部找矿预测研究中的应用[J].高校地质学报, 2009,15(4):460-469.
- [43]柳建新.一种区分矿与非矿的有效方法——伪随机多频相位法原理及其应用[J].中国地质,2001,28(9):41-46.
- [44]曾庆栋,沈远超,张启锐,等.伽玛能谱测量与隐伏金矿体预测[J].黄金,1999,20(1):4-7.
- [45]谢学锦.战术性与战略性的深穿透地球化学方法[J].地学前缘, 1998,5(2):254-266.
- [46]施俊法.矿产勘查地球化学发展的基本态势[J].中国地质,1997, (6):41-43.
- [47]陈进,毛先成,彭省临,等.物化探技术有效性定量评价方法研究——以凤凰山铜矿 CSAMT 法为例[J].大地构造与成矿学, 2010,34(2):263-269.
- ① 施俊法,等.隐伏矿勘查经验与启示——从《信息找矿战略与勘查百例》谈起.中国地质调查局发展研究中心,2007.